

UNIVERSITÉ DE FRIBOURG, SUISSE
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE MÉDECINE

En collaboration avec la
HAUTE ÉCOLE FÉDÉRALE DE SPORTS DE MACOLIN

Effets des vêtements biocéramiques sur la physiologie des
athlètes lors d'un exercice physique progressif

Travail final pour l'obtention du Master en
Sciences du Mouvement et du sport
Option Enseignement

Conseiller: Prof. Dr. Jean-Pierre BRESCIANI
Co-conseiller-ère: Alain ROUVENAZ

Robin DORSAZ
Fribourg, Juin, 2015

Table des matières

Résumé.....	3
1. Introduction	4
1.1. Adaptations physiologiques à l'effort	4
1.2. La VO ₂ max	5
1.3. Charge et récupération	8
1.4. Biochimie des activités physiques	9
1.4.1. Réserve énergétique	9
1.4.2. Dépense énergétique	9
1.4.3. Acide lactique et lactate	10
1.4.4. Variations de la lactatémie durant la récupération	11
1.5. La biocéramique et ses effets.....	12
1.6. Enregistrement de la fréquence cardiaque	14
1.7. Hypothèse de recherche	15
2. Méthodes et matériels	16
2.1. Participants.....	16
2.2. Appareils de mesure.....	17
2.3. Tâche.....	18
2.4. Design statistique	20
2.5. Enregistrement de la fréquence cardiaque	20
2.6. Analyses statistiques	21
3. Résultats	22
3.1. Étude de la population	22
3.2. Réponse chronotrope et récupération de la fréquence cardiaque	22
3.3. Analyses statistiques	23
3.4. Représentation graphique des indices de récupération de la fréquence cardiaque pour 1 et 3 minutes.....	24
3.5. Performance	24
4. Discussion et conclusions	26
5. Bibliographie	30
6. Déclaration personnelle.....	34
7. Droits d'auteur	34
8. Annexes.....	35
8.1. Annexe 1 : Données des sujets.....	35
8.2. Annexe 2 : Directives transmises au sujet.....	36
8.3. Annexe 3 : Analyses statistiques.....	37
8.4. Annexe 4 : Mesures et résultats obtenus lors des tests	39
8.5. Annexe 5 : Valeurs numériques obtenues pour les indices de récupérations à 1 et 3 minutes	40

Résumé

Il a été prouvé que des vêtements à enduction biocéramique augmentaient la circulation sanguine et favorisaient la thermorégulation ainsi que la relaxation musculaire. D'un point de vue général, elle favorise différentes caractéristiques fondamentales de l'activité musculaire. Cette étude avait pour but de déterminer si le port de vêtements à enduction biocéramique a un effet sur la physiologie lors de la phase de récupération chez des personnes ayant effectué un test d'activité physique progressif atteignant une intensité maximale.

Nous avons mesuré l'effet d'une combinaison biocéramique sur la fréquence cardiaque (FC) durant la phase de récupération faisant suite à un protocole de course sur tapis roulant se terminant à une intensité maximale. Cet effet a été mesuré au moyen d'un cardiofréquencemètre. Pour la moitié des tests, les participants portaient une combinaison entière à enduction biocéramique. Dans l'autre moitié des tests, ils portaient une combinaison « Placebo » avec quasiment la même apparence et élasticité que la biocéramique. Les résultats de cette étude n'ont révélé aucune différence significative sur la physiologie des sujets en phase de repos en condition biocéramique ou placebo.

Selon les résultats de cette recherche, aucune application pratique liée à la récupération suivant un exercice physique ne peut en être déduite scientifiquement.

1. Introduction

1.1. Adaptations physiologiques à l'effort

Un exercice physique commence lorsqu'il y a rupture de l'homéostasie des différents systèmes corporels calibrés dans une situation normale ou de repos. Les principales adaptations physiologiques causées par le commencement d'un exercice sont l'augmentation du flux sanguin, l'augmentation du débit cardiaque ainsi que l'augmentation de la température corporelle.

On distingue 3 grandes catégories d'adaptations physiologiques :

- Les adaptations locales, c'est-à-dire l'augmentation des produits du métabolisme comme la pression partielle du dioxyde de carbone (PCO_2), les ions H^+ produits par le muscle et responsable de l'acidose sanguine et les ions K^+ . Nous avons aussi une baisse de la pression partielle en oxygène (PO_2).
- Les adaptations régionales provoquées par inhibition rétrograde sur les troncs artériels sus-jacents.
- Les adaptations à distance sont celles qui joueront le rôle principal dans notre étude, notamment, la vasodilatation cutanée ainsi que l'accélération du rythme cardiaque provoquée par l'élévation de la température interne du corps.

D'un point de vue global, la distribution du sang aux tissus périphériques doit s'adapter à l'augmentation simultanée des besoins locaux et généraux. Au repos, dans les conditions normales, ce sont les organes à l'activité métabolique la plus importante qui reçoivent l'essentiel de la masse sanguine. Ainsi, pratiquement la moitié du volume sanguin se destine au foie et aux reins (27% et 22% respectivement), alors que les muscles n'en reçoivent que 15 %.

À l'exercice, il existe une redistribution de la masse sanguine au profit des territoires plus actifs, les muscles. Ainsi, lors d'un exercice épuisant, les muscles peuvent recevoir 80% (voire plus) de la masse sanguine disponible. Cette adaptation revient à multiplier le débit sanguin musculaire par 25.¹

¹ Wilmore, & Costill, 2006, p.187

Ceci est rendu possible parce plusieurs systèmes de l'organisme vont participer à cette activation :

- Le débit cardiaque (Q_c) augmentera (principalement par l'accroissement de la fréquence des contractions cardiaques ainsi que par celle du volume pompé, ou volume d'éjection systolique).
- La respiration, plus exactement la ventilation pulmonaire, augmentera (à la fois par élévation du volume respiratoire courant, et par celle de la fréquence respiratoire). C'est d'ailleurs principalement sur l'augmentation de la fréquence des contractions cardiaques que sont basés la majorité des tests d'exploration fonctionnelle de l'aptitude physique à l'exercice musculaire.²

Ainsi, le métabolisme global de notre organisme augmente lorsque nous pratiquons un exercice physique qu'il soit d'intensité maximale ou minimale. Notre corps a évolué de sorte qu'il puisse s'adapter rapidement à la dépense énergétique causée par sa mise en mouvement. Nous sommes capables de constituer des réserves énergétiques afin d'assurer ce besoin en énergie.

1.2. La VO_2 max

Un témoin fidèle de l'intensité de l'exercice qui est effectué est la consommation d'oxygène (VO_2). La VO_2 d'un sujet est proportionnelle à sa taille et sa masse ou plus exactement à sa masse cellulaire active, ce qui inclut le tissu musculaire et exclut le squelette et la masse grasseuse. En outre, elle est étroitement corrélée à l'intensité de l'exercice. Elle n'est jamais nulle, car cela correspond au métabolisme de base. Son augmentation est linéairement proportionnelle à l'intensité de l'exercice jusqu'à un certain seuil. Cette valeur limite vers laquelle la courbe de la VO_2 tend asymptotiquement est appelée la VO_2 max.

Il y a deux façons de mesurer la VO_2 max : la manière directe et indirecte. Nous ne disposons pas du matériel adéquat pour pratiquer une mesure directe de la VO_2 max. En effet, ce type de mesure requiert un ergomètre et un appareil permettant la mesure de la consommation d'oxygène, en circuit fermé ou en circuit ouvert. Nous nous sommes donc basés sur une mesure indirecte de la VO_2 max.

² Harichaux, & Medelli, 2002, p.18

Elle se base sur la relation entre le débit cardiaque (Q_c), le volume d'éjection systolique (VES) et la fréquence cardiaque (FC). On obtient la formule : $Q_c = VES \times FC$

Le Q_c est de l'ordre de 5 L/min au repos chez l'adulte. Il peut être multiplié jusqu'à 5 fois durant l'effort.

“Cette augmentation est linéairement proportionnelle jusqu'à une certaine limite (Figure 1 b), et principalement due à l'augmentation de la fréquence cardiaque. Celle-ci, plus basse au repos chez le sportif entraîné que chez l'adulte sédentaire, peut être de l'ordre de 50 battements par minute (bpm). Si la fréquence est portée à 200, le facteur de multiplication est de 4. Mais le VES est augmenté au maximum de 25 %. Le facteur de multiplication devient donc $4 \times 1,25 = 5$, dans lequel l'augmentation de la fréquence est le facteur majeur (Figure 1 c).

Dans ces conditions :

- Puisque, jusqu'à une certaine limite, l'augmentation de la VO_2 est linéaire par rapport à la puissance de l'exercice musculaire,
- Et puisque, jusqu'à une certaine limite, l'augmentation du Q_c est également linéaire par rapport à cette puissance,

⇒ On peut opérer une « translation d'ordonnées », et représenter la variation, qui reste linéaire, de Q_c par rapport à VO_2 (Figure 1 d).

⇒ De la même manière, comme l'augmentation de la FC, principal facteur d'augmentation, le Q_c , est linéaire par rapport à la puissance de l'exercice musculaire, et qu'elle est le principal facteur d'augmentation de Q_c , on peut ainsi représenter, par translation d'ordonnées, la variation de FC en fonction de VO_2 (Figure 1 e).” (Harichaux, & Medelli, 2002, p.91)

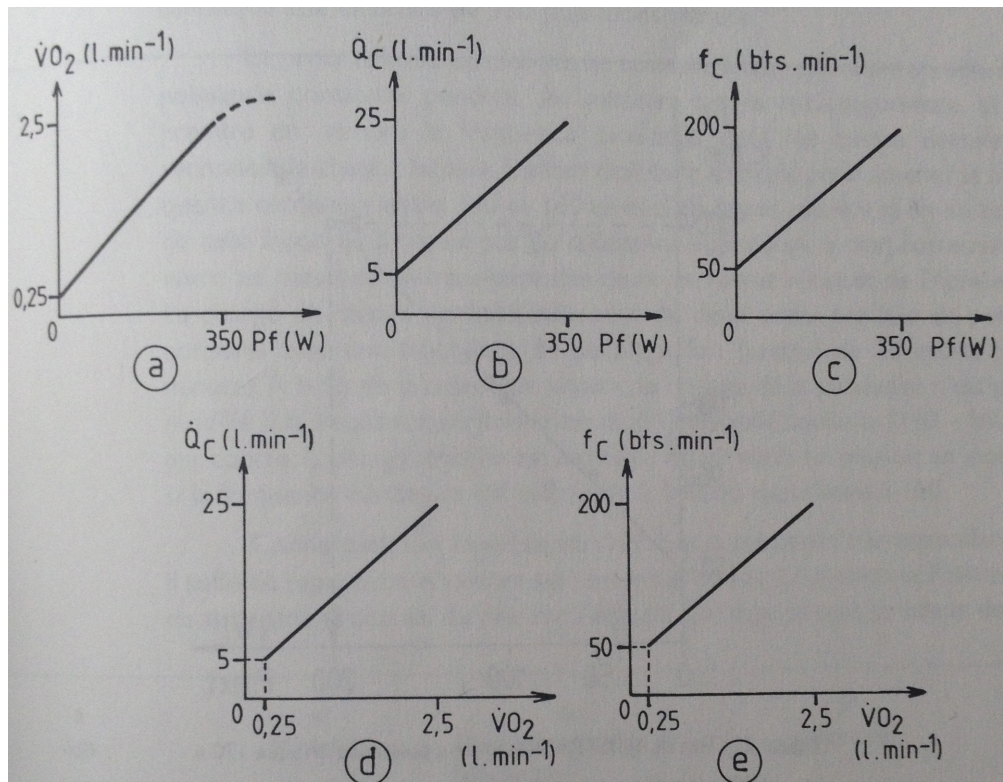


Figure 1: Corrélation entre les variations de divers paramètres par rapport à la puissance développée (a, b et c), et relation linéaire cardiaque (\dot{Q}_C) et de la fréquence cardiaque (f_C) en fonction de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$; d et e).

“En conclusion, on peut retenir que ces différents mécanismes permettent de multiplier par 40 ou 50 le débit de perfusion au niveau des territoires en activité ; cette adaptation va de pair avec une augmentation marquée de la perfusion dans les territoires spécialisés dans les transferts énergétiques indispensables (peau, poumons), tout en maintenant un débit adéquat au niveau des territoires privilégiés, en particulier du système nerveux central. (...) D'autre part, il semble que chez le sujet sain soumis à des conditions ambiantes normales, cette fréquence maximale soit atteinte quasiment en même temps que les autres adaptations maximales, en particulier l'extraction tissulaire d'oxygène (O_2). Ceci permet de comprendre qu'il existe pour chaque sujet, et d'autant plus que les conditions sont comparables, une excellente corrélation entre la dépense énergétique et la fréquence cardiaque ; son plafonnement coïncide avec la saturation des systèmes de transfert d'énergie et annonce l'arrêt imminent de l'exercice. Toute augmentation de la dépense énergétique d'origine musculaire ou autre, ou toute défaillance même minime d'un des éléments du transfert énergétique, obligent le muscle à compenser ce déficit par des mécanismes plus coûteux (glycogénolyse anaérobie en particulier) qui précipite l'épuisement.” (Thomas, Eclache, & Keller, 1989, p.124)

1.3. Charge et récupération

D'un point de vue de la biologie sportive et de la physiologie de la performance, l'entraînement est d'une façon générale un processus d'adaptation à la charge de travail. Et les stimuli d'entraînement, facteurs perturbateurs de l'homéostasie, sont les moteurs de la transformation et de l'adaptation des systèmes sollicités.

Le processus d'évolution des phénomènes adaptatifs résultant de l'entraînement se divise en phases. On distingue la phase de charge ou phase de travail et la phase de récupération, y compris le mécanisme de surcompensation. Ainsi que le montre la figure 2, on observe à la suite de la charge d'entraînement une baisse passagère de la capacité de performance sportive (baisse du potentiel énergétique) suivie d'une remontée (dans la phase de récupération) au-dessus du niveau de départ. Cette capacité de performance accrue correspond au stade de *surcompensation*.³

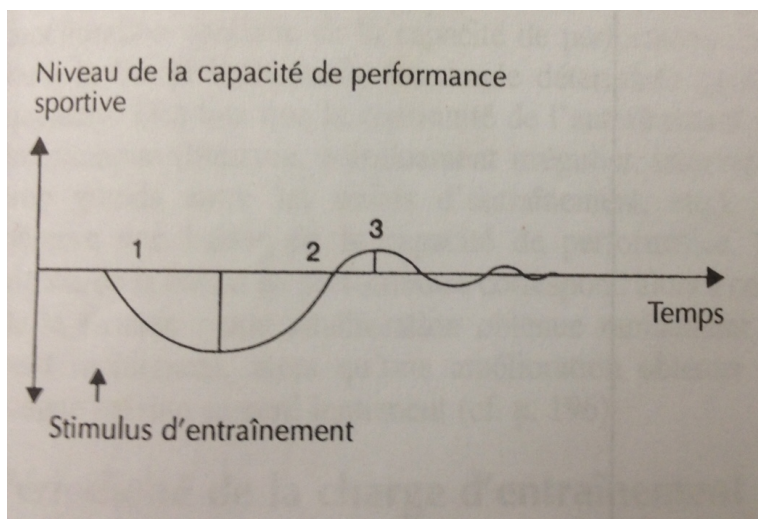


Figure 2: Phases de variation de la capacité de performance à la suite d'un stimulus d'entraînement. 1. Phase de baisse de la capacité de performance sportive; 2. Phase de remontée de la capacité de performance sportive; 3. Phase de surcompensation.

Le fonctionnement des divers tissus ou organes de l'organisme humain nécessite des dépenses énergétiques, ou des taux métaboliques, qui leur sont spécifiques. Ces différentes dépenses sont intimement liées aux processus oxydatifs.

Toute cellule vivante peut être décrite comme un système thermodynamique ouvert par lequel des réactions chimiques sont liées entre elles pour promouvoir la libération

³ Weineck, 1996, p.25

d'énergie à partir de substrats énergétiques organiques complexes (le catabolisme), ou pour réaliser une synthèse de molécules constitutives de la matière vivante (l'anabolisme). Les deux types de réactions constituent le métabolisme. Toutes ces réactions métaboliques sont régies par des enzymes qui régularisent les vitesses de transformation ainsi que leur activation ou inhibition.

1.4. Biochimie des activités physiques

1.4.1. Réserve énergétique

L'aptitude à réaliser une performance sportive dépend de nombreux facteurs et tout particulièrement des réserves en substrats. Nous savons que l'apport d'énergie indispensable à la contraction musculaire réside dans l'hydrolyse de la molécule d'ATP. Il est dès lors intéressant d'apprécier la quantité de substrats disponibles pour une conversion en ATP via les cycles métaboliques.

1.4.2. Dépense énergétique

L'énergie fournie sous forme d'ATP par les diverses voies métaboliques provient de mécanismes anaérobie et aérobie. Ainsi, on estime que le pourcentage d'ATP provenant de la filière anaérobie est approximativement de 97-98% pour une course de 100m, de 50% pour une course de 800m. En revanche, le 5000m et le marathon nécessitent respectivement 87% et 100% de la filière aérobie⁴.

Dans notre étude, les coureurs pratiquent un test triangulaire. C'est-à-dire que la vitesse de course croît de manière progressive par paliers, durant l'exercice, jusqu'à ce que les sujets ne puissent plus soutenir la cadence. Il y a donc, dans notre cas, un mix des différentes voies métaboliques avec une prédominance du mécanisme aérobie.

⁴ Newsholme et al., 1998

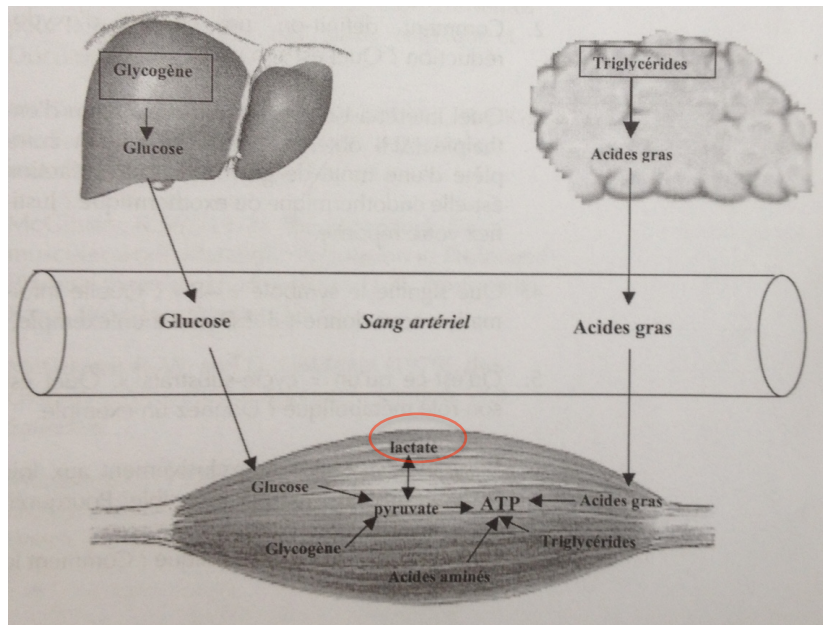


Figure 3 : Apports en molécule d'ATP musculaire, via les différents cycles métaboliques tissulaires et mise en évidence de la production de lactate.

1.4.3. Acide lactique et lactate

L'idée selon laquelle l'acide lactique est un élément qui conditionne la performance sportive est maintenant révolue. En effet, après des années de recherche, les spécialistes de la physiologie de l'exercice physique peuvent affirmer que ce n'est pas l'acide lactique, mais bien l'acidose sanguine qui pousse le sportif à arrêter son exercice physique.

“Plutôt que d'être le signe d'une limite à la performance, le taux de lactatémie qui résulte de la dégradation de l'acide lactique est le témoin de l'efficacité de la glycolyse. Il conditionne la capacité à repousser le moment où l'on devra arrêter l'exercice, c'est-à-dire le moment où l'acidose métabolique (non lactique) serait trop élevée pour que les enzymes puissent correctement travailler.” (Rosberg et al., 2004)

La production de lactate au sein d'un muscle est intimement dépendante de l'intensité de l'exercice. D'une valeur proche des conditions de repos lors d'un exercice de faible intensité (par exemple 35% de VO_2 max), elle atteint des concentrations élevées (50 fois les valeurs basales) au cours d'exercices intensifs (90 à 150 % de VO_2 max) maintenus pendant plusieurs minutes (Figure 4).

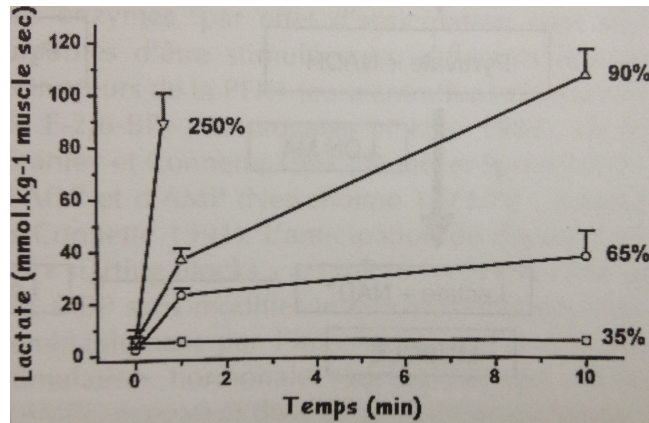


Figure 4 : Lactate musculaire (vaste externe du quadriceps) chez l'homme au cours d'exercices d'intensité croissante sur cycle ergomètre, de 35% à 250% de $\dot{V}O_2$ max (Spriet, Howlett et al., 2000)

1.4.4. Variations de la lactatémie durant la récupération

Dès l'arrêt de l'exercice, la clairance du lactate suit une courbe exponentielle décroissante au niveau des muscles précédemment actifs. L'élimination du lactate sanguin est un processus relativement lent, les valeurs basales sont établies approximativement une heure après la fin de l'exercice.

Afin d'accélérer l'élimination du lactate sanguin, plusieurs auteurs ont imaginé de soumettre les sujets à une récupération dite active après l'exercice. La première expérimentation en la matière est réalisée par Jervell en 1928 (sur un seul sujet). Le même résultat est obtenu neuf ans plus tard par Newman et coll. Ces derniers indiquent que la réduction de la lactatémie dépend également de l'intensité de l'exercice pratiqué en phase de récupération. Ces faits sont à présent confirmés (Gladden, 1989). Un exemple typique est repris dans la figure ci-dessous.

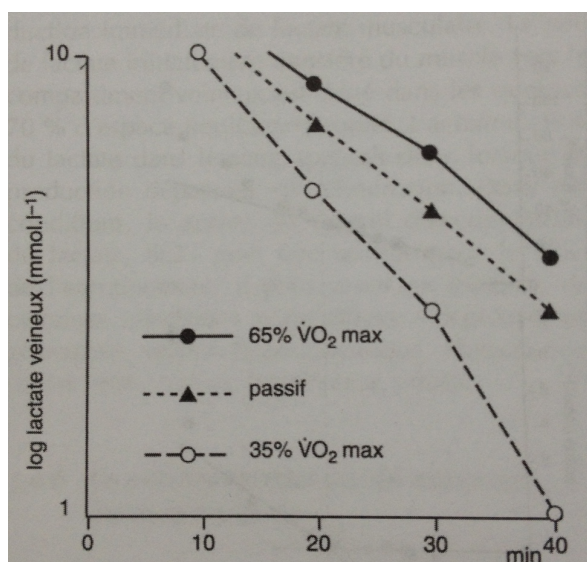


Figure 5 : Evolution de la lactatémie en phase post-exercice lors d'une récupération active ou passive avec des sujets sédentaires. (Dodd, Powers et coll., 1984)

En règle générale, chez un sujet sédentaire ou moyennement actif, l'élimination maximale du lactate sanguin est observée après la réalisation d'un exercice à 30-35% du VO_2 max en phase de récupération. En deçà de cette intensité d'effort, l'élimination du lactate est semblable à celle rencontrée lors d'une récupération passive. Au-delà de 35% du VO_2 max, la lactatémie s'accroît à nouveau, car le lactate produit au niveau musculaire s'accumule dans les muscles maintenus actifs.

Chez le sujet entraîné, un exercice à 60 % du VO_2 max peut être maintenu dans la phase de récupération, car leur potentiel oxydatif musculaire est plus élevé. Le lactate est essentiellement oxydé par les muscles actifs. Le cœur y participe également dans une proportion importante.⁵

1.5. La biocéramique et ses effets

La biocéramique est un mélange de roches volcaniques qui émet à haute concentration des rayons infrarouges lointains (RIL). La technologie de la biocéramique appliquée à la physiologie de l'être humain est, depuis le début des années 80, sujette à de nombreuses études scientifiques.

Récemment, des vêtements à enduction biocéramique ont été manufacturés dans le but d'améliorer la performance dans le domaine des loisirs ainsi que dans le monde compétitif du sport (Vatansever, & Hamblin, 2012). Il existe différentes techniques d'enduction. Cependant de manière générale, elle consiste à recouvrir une couche de base (*nylon, polypropylène, polyester, coton*) d'une couche protectrice afin de modifier son aspect et ses caractéristiques physiques.

Le principal effet ressortant des différentes études est l'augmentation de la microcirculation sanguine. La céramique augmente l'insolation thermique en reflétant les RIL produits par le corps sur sa propre surface (Yoo, Kim, Cho, Shim, & Lee, 1993).

L'émission de ces rayons RIL se fait par l'énergie que procure le corps humain au vêtement. Cette chaleur corporelle représente la principale source d'énergie. Elle est transférée aux particules biocéramiques qui agissent comme "absorbeurs". Les particules biocéramiques maintiennent ainsi leur température à un niveau suffisamment élevé, afin de produire en retour les rayons (RIL) vers la surface du corps (Vatansever, & Hamblin, 2012).

⁵ Poortmans, & Boisseau, 2012, p.190

Ciblée au monde du sport, l'utilité de la biocéramique a déjà été démontrée par son addition aux vêtements portés (Katsuura, Fukuda, Okada, & Kikuchi, 1989). L'étude montrait une augmentation du flux sanguin lorsque les sujets portaient des vêtements pourvus de biocéramique durant un exercice de 30 minutes sur un vélo ergomètre à un taux de travail de 75 W dans un environnement stable. Une seconde étude plus récente de Leung et ses collègues en 2013 montrait une tendance à la diminution de la fatigue et une réduction de la température corporelle chez des sujets portant un shirt biocéramique, durant une course de 30 minutes à une vitesse constante de 6 km/h.

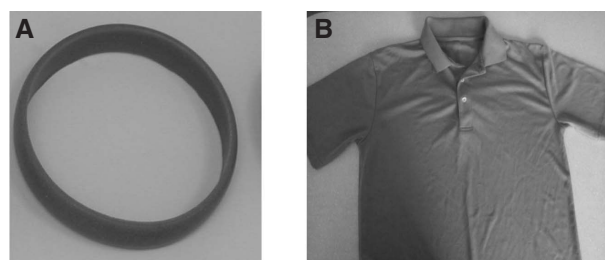


Figure 6 : A Bracelet en silicone et biocéramique ; B shirt en biocéramique utilisés pour l'expérience. (Leung et al., 2013, p.2)

En 2011, Leung et ses collègues avaient déjà démontré l'effet physiologique des RIL émis par la céramique sur des muscles squelettiques d'amphibiens. Ils électro-stimulaient des cellules musculaires et ces RIL retardaient l'apparition de la fatigue induite par la contraction musculaire. Ils suggérèrent que la présence de biocéramique pouvait normaliser l'acidification suivant la contraction musculaire.

Malgré le fait que les mécanismes concernant les effets hyperthermiques et l'activité biologique de l'irradiation des RIL sont peu connus, on peut tout de même s'accorder sur le fait que la biocéramique contribue à l'augmentation de la résistance à la fatigue et à la diminution de la perte d'énergie (Leung et al., 2013).

1.6. Enregistrement de la fréquence cardiaque

La baisse de la fréquence cardiaque en phase de récupération, appelée dans cette étude « Indice de récupération » est une variable prédictive qui est utilisée premièrement pour analyser le stress physiologique ainsi que la condition physique d'un individu (Chorbajian, 1971), deuxièmement pour enregistrer et suivre la réponse d'un athlète à une charge d'entraînement et finalement pour des prescriptions d'entraînement (Borresen, & Lambert, 2007).

Une baisse plus rapide de la fréquence cardiaque suivant un exercice a été analysée chez les personnes ayant une plus grande capacité aérobie (Hirsh et al., 2006 ; Goldberg, & Shepard, 1980 ; Kirby, & Hartung, 1980 ; Sidney, & Shepard, 1978 ; Brown, & Brown, 2007 ; Borresen, & Lambert, 2008 ; Darr et al., 1988) ainsi que chez les sujets entraînés aux exercices fractionnés ciblant le domaine de la physiologie lactique, anciennement appelés les exercices de “ résistance aérobie ” (Bosquet et al., 2007 ; Goldsmith et al., 2000 ; Huikuri et al., 1999 ; Parekh, & Lee, 2005 ; Esco et al., 2010 ; Savin et al., 1982 ; Cole et al., 1999 ; Borresen, & Lambert, 2007 ; Bunc et al., 1988 ; Short, & Sedlock, 1997 ; Buchheit, & Gindre, 2006 ; Buchheit et al., 2007 ; Cooke, & Carter, 2005 ; Goldberger et al., 2006 ; Seiler et al., 2007 ; Martinmaki, & Rusko, 2008).

Toutes ces études suggèrent que la baisse de la fréquence cardiaque post-exercice est un bon marqueur pour les changements induits par l'entraînement dans le contrôle autonome. Il se manifeste sous un système de réactivation vagale plus rapide et/ou un retrait plus rapide de l'influence du système sympathique sur le tonus (Borresen, & Lambert, 2008).

Pour notre travail, nous avons suivi la méthode utilisée par Vicente-Campos et ses collègues en 2014. Dans leur étude intitulée : « Heart rate recovery normality data recorded in response to a maximal exercise test in physically active men », ils ont créé une base de données concernant les fréquences cardiaques ainsi que des indices de récupération pour une large population d'adultes physiquement actifs.

Les détails concernant l'enregistrement et l'analyse des données des fréquences cardiaques sont expliqués dans le chapitre « Méthodes et matériels ».

1.7. Hypothèse de recherche

En nous appuyant sur les résultats des études scientifiques consacrées à la biocéramique lorsqu'elle est appliquée à un tissu (sa capacité de réflexion des RIL, sa perfusion cutanée augmentant la température corporelle et la vasodilation locale) nous avons supposé que l'accélération de la microcirculation sanguine pouvait avoir un effet significatif sur la fréquence cardiaque lors de la pratique d'un exercice physique triangulaire de puissance maximale.

L'hypothèse de base était que le sujet en « condition biocéramique » avait une FC plus basse à 1 et 3 minutes suivant l'arrêt de l'exercice comparé à la condition placebo. Nous l'avons formulée, en pensant que la biocéramique améliorerait peut-être la récupération active et passive du sujet. Ainsi, la pente de régression de la FC augmenterait grâce aux vêtements à enduction biocéramique.

2. Méthodes et matériels

2.1. Participants

14 sujets ont participé à l'expérience dont 10 hommes et 4 femmes (moyenne d'âge de 21 ans, avec un écart-type de ± 1.14). Ils ont été sélectionnés parmi une population définie. En effet, le recrutement s'est effectué, à l'université de Fribourg, dans une classe de l'Unité des Sciences du Mouvement et du Sport. Pour faire partie de cette population, les sujets sont entraînés physiquement. Ils remplissaient les critères de niveau de performance physique et psychologique. Ils ont été évalués dans différentes disciplines, notamment la course. Ils ont tous subi un test VAMEVAL dans le cadre de leur formation 33 jours avant le début de notre expérience. Le VAMEVAL est un test qui permet d'évaluer la VMA (vitesse maximale aérobie) à partir d'une course à vitesse progressivement accélérée par paliers d'une minute. Le rythme est imposé par une bande sonore. La vitesse maximale aérobie des athlètes est déterminée à VO_2 max et correspond au dernier palier de vitesse complété.

La moyenne des VMA de nos 14 sujets était de 16.6 (± 2.3). Nous pouvons donc affirmer selon le tableau ci-dessous que de manière générale nos sujets possédaient un niveau de performance physique allant de bon à excellent. Il est nécessaire de préciser que ce tableau donne à titre indicatif les valeurs de VO_2 max en fonction du niveau de condition physique. Le genre des athlètes n'est pas pris en compte et les sujets sont considérés comme "Adulte" dès leur 20^{ème} année.

Tableau 1 : Valeurs de VO_2 max et VAM équivalente représentatives de la population standard (Reiss, & Prévost, 2013, p. 122)

Populations	VO_2 max (ml/min/kg)	VAM équivalente (km/h)
Adultes peu ou moyennement actifs	30 à 45	8.8 à 12.8
Adultes en bonne condition physique	45 à 55	12.8 à 15.8
Adultes en excellente condition physique	55 à 65	15.8 à 18.5
Athlètes d'élites en sports aérobies	65 à 90	> 18.5

Aucun des participants n'a déjà été sujet à des maladies cardio-respiratoires et vasculaires ou n'était sous médication cardioactive. Ils étaient naïfs au but de l'étude, c'est à dire qu'ils n'avaient pas connaissance des différents objectifs de cette étude. Ils ont apporté leur accord de manière écrite en fonction des informations données. Ils avaient à leur connaissance le déroulement général du test et sa durée totale, c'est-à-dire un test maximal de performance aérobie sur tapis roulant dans deux conditions différentes représentant deux technologies différentes. Cette recherche a été menée en accord avec les standards éthiques spécifiés en 1964 dans la déclaration d'Helsinki et la revue de l'éthique de l'Université de Fribourg.

2.2. Appareils de mesure

- L'expérience a été menée, à Fribourg, dans un laboratoire de l'unité des Sciences du Mouvement et du Sport. C'était un environnement contrôlé et propice à l'effort physique. La moyenne de la température ambiante était de 22.8 degrés Celsius (± 1.8) ainsi que la moyenne de l'hygrométrie de 33.64% d'humidité relative (± 9.84).
- Un cardiofréquencemètre était utilisé pour mesurer la fréquence cardiaque. L'enregistrement des données se faisait de manière "beat to beat", signifiant que le logiciel de l'ordinateur enregistrerait chaque battement cardiaque. Le matériel était de marque "Polar" et contenait au total : une station de base, un émetteur ainsi qu'un logiciel de traitement des données : TEAM²; version 1.4.5 ; 1977-2013 Polar Electro Oy.
- Les deux types de tissus ont été confectionnés avec du polyester (85%) et du spandex (15%). La combinaison biocéramique contenait une couche supplémentaire intégrée d'induction de biocéramique (7 grammes de biocéramique par mètre carré de tissu, représentant le 5% du poids total de l'habit). La combinaison comprend deux pièces. Une pièce pour le haut et une pour le bas. L'ensemble recouvre la totalité du corps excepté les pieds, les mains, le cou et la tête. Nous avons reçu les habits en 4 tailles différentes (S, M, L et XL). Les tailles portées étaient donc les mêmes dans les 2 conditions. Il y avait aussi une adaptation au genre du sujet, mais uniquement pour la partie du haut. Pour n'importe quelle taille, la biocéramique et le placebo étaient identiques en taille et élasticité. Il y avait une différence notable entre les 2 conditions au niveau de l'apparence du tissu. Le tissu biocéramique avait des mosaïques imprimées que l'on pouvait différencier à la vue et au toucher. Les combinaisons ont été fournies par la société HT Concept basée en France.

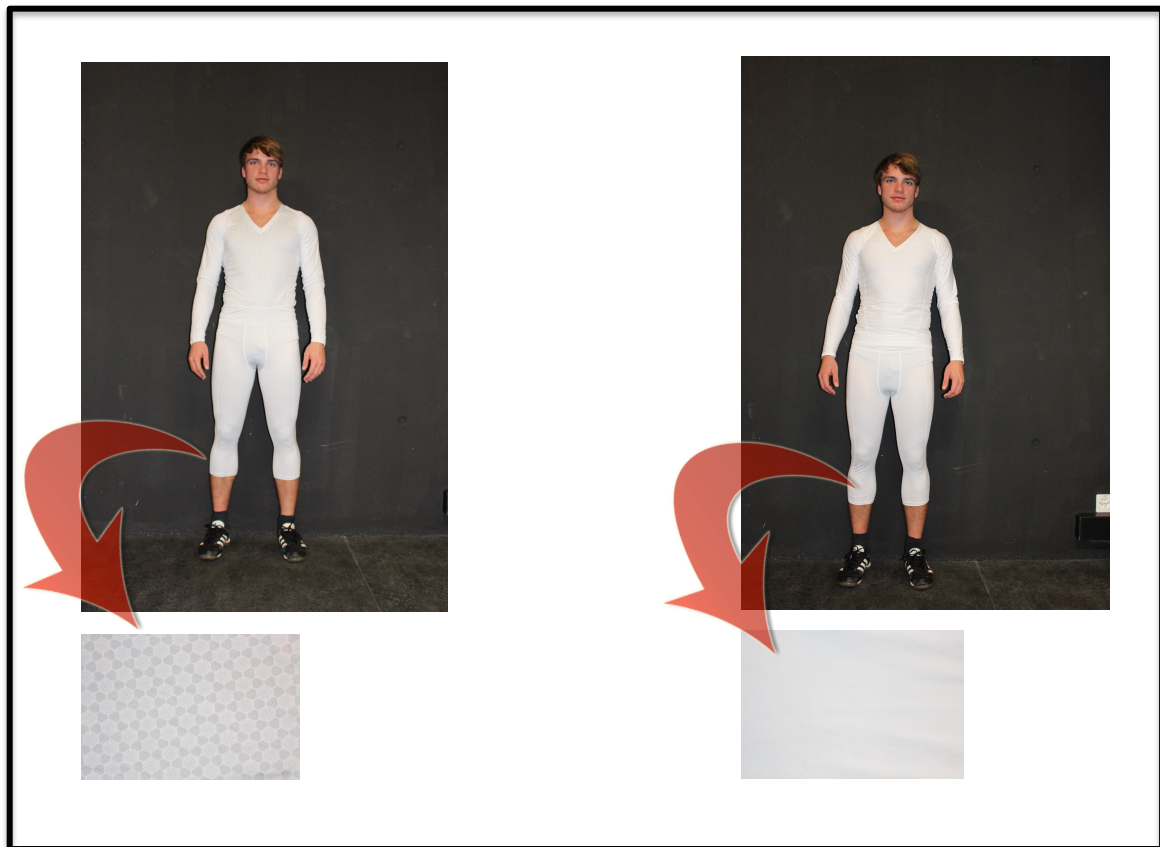


Figure 7: Sujets en combinaison biocéramique et placebo avec zoom sur le tissu

2.3. Tâche

Arrivés au laboratoire, les sujets revêtaient une combinaison. Ils devaient garder uniquement leurs sous-vêtements. C'était soit la combinaison biocéramique, soit la combinaison placebo. Ils ont également été équipés d'un cardiofréquencemètre.

Pour leur échauffement, les sujets devaient courir 5 minutes sur un tapis roulant à 50% de leur VMA obtenue un mois plus tôt et avec une pente de 0%. Au terme de l'échauffement, le signal de départ pour la phase principale du test était donné par la valeur de la fréquence cardiaque du sujet. En effet, nous attendions qu'elle soit redescendue en dessous d'une valeur égale à 60% de la fréquence cardiaque maximale (FC max). C'est une valeur arbitraire qui a été fixée dans le but de faire diminuer la fréquence cardiaque des sujets et de leur permettre de commencer le test de manière la plus optimale possible.

Cette condition étant remplie, la phase principale pouvait commencer. Les sujets débutaient leur course à une vitesse représentant 67% de leur VMA (arrondie à 0.5) et avec une pente de 1%. Cette pente est présente dans tous les tests sur tapis roulant, elle

compense l'absence de résistance au vent par rapport au test sur le terrain (Carré, & Laporte, 2009, p.52).

Le fait de débiter la phase principale du test à 67 % de la VMA permettait de standardiser la durée du test. (Moyenne de temps de course = 12 minutes et 57 secondes avec un écart-type de ± 1 minute et 14 secondes).

La vitesse augmentait chaque minute de 0.5 km/h. Les sujets devaient courir jusqu'à épuisement total. Dès qu'ils ne pouvaient plus soutenir la vitesse imposée, l'exercice se terminait. Le sujet passait directement à la phase de récupération active. Cette dernière correspondait à une marche de 4km/h durant 2 minutes avec une pente de 0%. Enfin, après ces 2 minutes, les sujets restaient encore 1 minute en position orthostatique sur le tapis roulant et sans bouger. Cette minute correspondait à la phase de récupération passive. Concernant les phases de récupération active et passive, les sujets avaient comme consigne de se focaliser sur leur fréquence cardiaque. Avec la fin de la récupération passive se terminait l'expérience.



Figure 8: Sujet dans la phase principale du test en condition placebo

2.4. Design statistique

Les sujets ont été astreints à un test par combinaison, pour un total de 2 tests. Chaque test durait au total 50 minutes avec un temps de course effectif en moyenne de 20 minutes avec un écart-type de ± 2 minutes (échauffement, partie centrale et récupération). La moitié des sujets débutèrent avec les vêtements à induction biocéramique et l'autre moitié avec les vêtements Placebo. Ainsi, on avait une distribution symétrique des variables. Les deux tests ont été exécutés avec exactement une semaine (7 jours) d'écart. Ce qui signifie que les sujets ont effectué le test à la même heure et le même jour de la semaine afin d'obtenir les conditions les plus similaires entre les 2 conditions. De plus avec une semaine d'écart, la fatigue liée à la pratique du test n'interférait pas avec les résultats du deuxième test.

Afin de garantir les conditions les plus similaires entre les 2 tests, les participants ont reçu des directives strictes à respecter durant les 48 heures précédant les 2 tests (Annexe 2).

2.5. Enregistrement de la fréquence cardiaque

La période d'enregistrement de la fréquence cardiaque, que nous avons étudiée, correspondait à la phase de récupération. Elle débutait directement après la fin de l'exercice physique et durait au total 3 minutes.

3 valeurs importantes étaient calculées pour chaque sujet et chaque condition de passage :

- La fréquence cardiaque maximale obtenue durant le test (FC-max)
- La moyenne des 5 dernières valeurs obtenues 1 minute après l'arrêt de l'effort (FC-1)
- La moyenne des 5 dernières valeurs obtenues 3 minutes après l'arrêt de l'effort (FC-3)

Nous avons calculé ces 2 moyennes afin de prévenir des résultats faussés par une arythmie sinusale.

Les indices de récupération (RFC) étaient calculés en soustrayant la moyenne obtenue pour chaque période à la fréquence cardiaque maximale obtenue durant le test. Nous les avons nommés respectivement RFC-1 et RFC-3 (Tulmen et al., 2011 ; Cole et al., 1999).

Le changement relatif dans l'indice de récupération a été déterminé par la diminution produite à 1 et 3 minutes après l'arrêt de l'exercice et exprimé en pourcentage de la fréquence cardiaque maximale obtenue ($\%RFC-1 / FC\text{-max}$ et $\%RFC-3 / FC\text{-max}$).

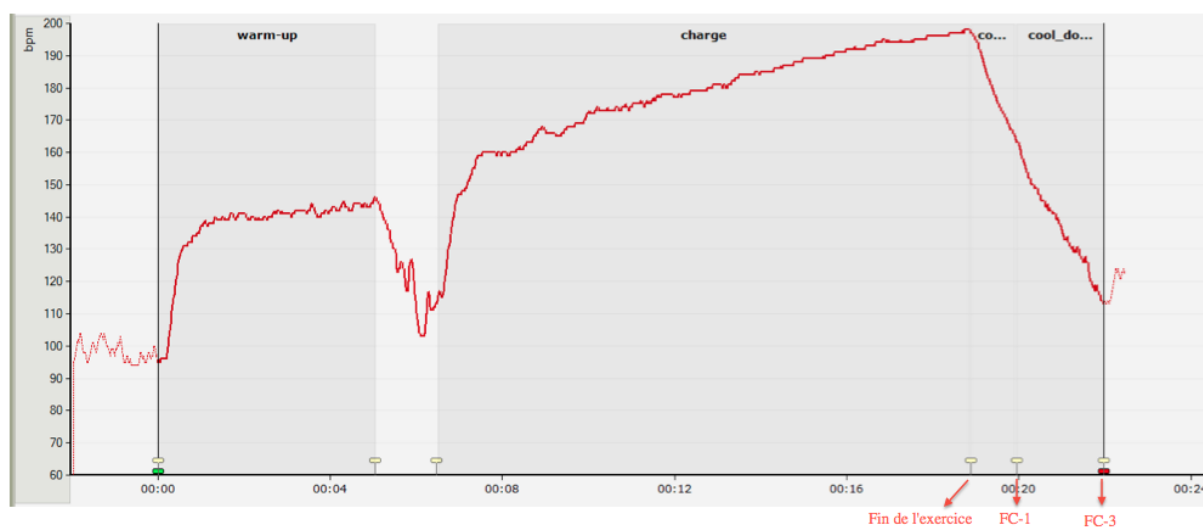


Figure 9: Exemple de l'enregistrement de la FC d'un sujet

Tableau 2: Valeurs associées à la figure 9

FC max (bpm)	198
FC-1 (bpm)	166
RFC-1	32
$\%RFC-1 / FC\text{ max}$	16.16
FC-3 (bpm)	115.8
RFC-3	82.2
$\%RFC-3 / FC\text{ max}$	41.51

FC-1 ainsi que FC-3 sont respectivement les valeurs moyennes des 5 derniers enregistrements de la fréquence cardiaque à 1 minute et 3 minutes de récupération.

2.6. Analyses statistiques

La normalité de la distribution des données a été évaluée en utilisant le test de Shapiro-Wilk. L'homogénéité des variances a été évaluée avec le test de Levene. Les résultats ont montré que toutes les données étaient paramétriques pour les 2 conditions (Annexe 3). Afin de déterminer une différence significative entre les variables indépendantes (Biocéramique et Placebo), des tests « PAIRED-T-TEST » ont été effectués. Tous les tests de statistique ont été effectués avec le langage R dans RStudio (Version 0.98.501 – © 2009-2013 RStudio, Inc.)

3. Résultats

3.1. Étude de la population

Les caractéristiques démographiques de nos sujets (n= 14) étaient :

âge 21.3 ± 1.14 (20-24 ans), taille 173.4 ± 7.6 cm, poids 64.3 ± 7.7 kg et BMI 21.3 ± 1.3 kg/m².

3.2. Réponse chronotrope et récupération de la fréquence cardiaque

Les valeurs moyennes obtenues pour la réponse chronotrope des sujets ainsi que la récupération de la fréquence cardiaque (RFC) en fonction des 2 conditions de passage (Placebo/ Biocéramique) sont données dans le tableau 3.

Les moyennes de RFC-1 avec la combinaison placebo et biocéramique étaient, respectivement, de 36.38 ± 10.29 et 34.98 ± 9.97 bpm.

Les moyennes de RFC-3 avec la combinaison placebo et biocéramique étaient, respectivement, de 76.53 ± 11.07 et 76.68 ± 9.76 bpm.

Ces moyennes correspondaient à la moyenne des valeurs de la FC dans les 2 conditions (placebo et biocéramique) 162.47 ± 11.20 et 166.44 ± 14.23 bpm enregistrées à 1 minute de récupération, ainsi que 122.33 ± 12.07 et 124.74 ± 13.11 bpm enregistrées à 3 minutes. Les indices de récupération en fonction de la fréquence cardiaque maximale obtenues durant l'exercice, sont données ici en pourcentage, à savoir :

%RFC-1 /FC-max = 18.29 ± 5.17 (Placebo) et 17.44 ± 5.13 (Biocéramique),

%RFC-3 /FC-max = 38.50 ± 5.65 (Placebo) et 38.14 ± 5.06 (Biocéramique).

Tableau 3: Réponses chronotropiques des sujets, fréquences cardiaques ainsi que récupérations

Conditions	Placebo		Biocéramique	
Variable	Mean	±SD	Mean	±SD
Temps en exercice (min)	12.09	±1.23	12.48	±1.03
FC max (bpm)	198.85	±5.86	201.43	±7.74
Pourcentage-FC Prédite (%)	98.66	±2.13	99.94	±3.44
FC à 1 minute de récupération (bpm)	162.47	±11.20	166.44	±14.23
RFC-1 (bpm)	36.38	±10.29	34.98	±9.97
%RFC-1/ FC max (%)	18.29	±5.17	17.44	±5.13
FC à 3 minutes de récupération (bpm)	122.33	±12.07	124.74	±13.11
RFC-3 (bpm)	76.53	±11.07	76.68	±9.76
%RFC-3/ FC max (%)	38.50	±5.65	38.14	±5.06

Les données sont exprimées en moyenne avec les écarts-types correspondants.

3.3. Analyses statistiques

Nos données RFC-1 concernant les 14 sujets sont paramétriques (Annexe 3).

Afin de tester s'il y a effectivement une différence significative entre les 2 conditions (Placebo et Biocéramique), nous avons effectué un test « Paired t-test » :

```
T-TEST:

      Paired t-test

data:  HRR.1.bio and HRR.1.contr
t = -0.9239, df = 13, p-value = 0.3723
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -2.850518  1.142699
sample estimates:
mean of the differences
      -0.8539098
```

Nous n'avons trouvé aucune différence significative entre les 2 conditions (p-value= 0.3723) pour les données RFC-1.

Nos données RFC-3 concernant les 14 sujets sont paramétriques (Annexe 3).

Afin de tester s'il y a effectivement une différence significative entre les 2 conditions (Placebo et Biocéramique), nous avons effectué un test « Paired t-test » :

```
T-TEST:

      Paired t-test

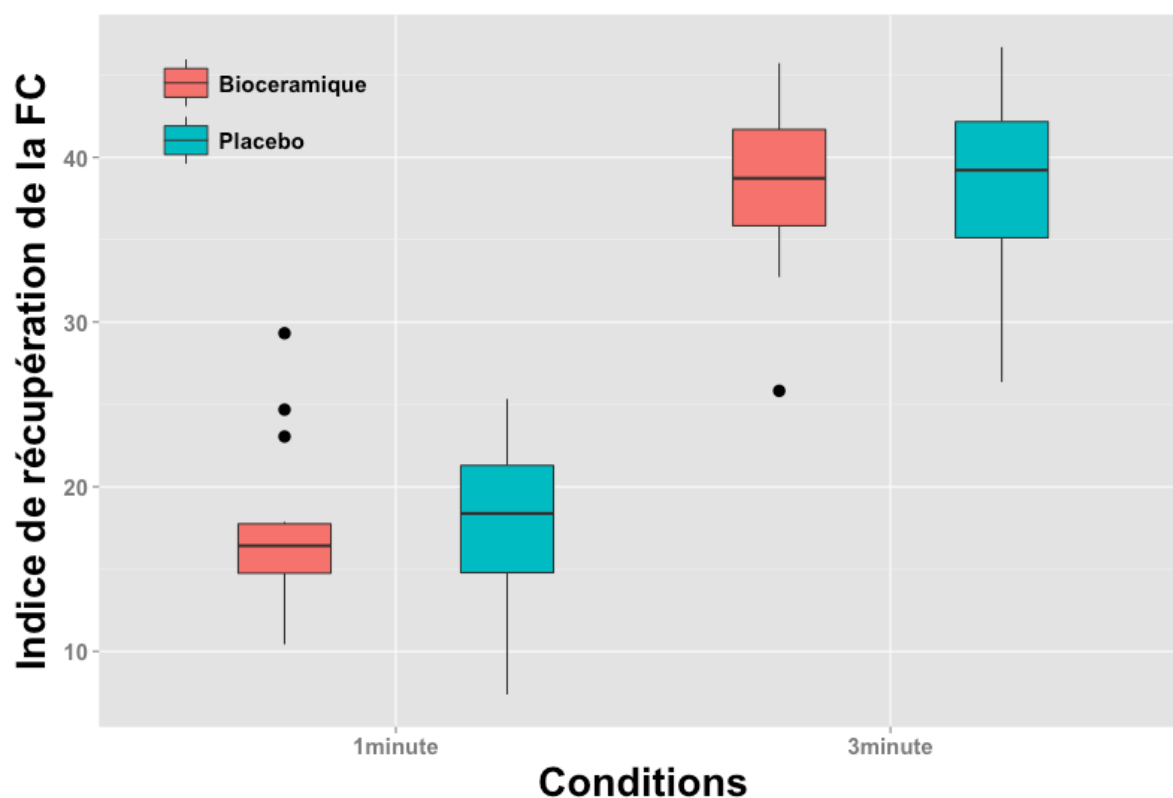
data:  HRR.3.bio and HRR.3.contr
t = -0.294, df = 13, p-value = 0.7734
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -3.041839  2.313177
sample estimates:
mean of the differences
      -0.3643307
```

Nous n'avons trouvé aucune différence significative entre les 2 conditions (p-value= 0.7734) pour les données RFC-3.

Le tableau des données RFC-1, RFC-3 en conditions Placebo et Biocéramique est en annexe (Annexe 5).

3.4. Représentation graphique des indices de récupération de la fréquence cardiaque pour 1 et 3 minutes.

Tableau 4: Représentation graphique des indices de récupération de la FC en fonction des variables indépendantes



3.5. Performance

Dans ce paragraphe traitant de la performance des sujets. Nous avons recueilli les différentes distances parcourues par les sujets dans les 2 conditions différentes. Ces distances ont été calculées en mètre par le tapis roulant. Nous les avons rassemblées dans les deux tableaux suivants.

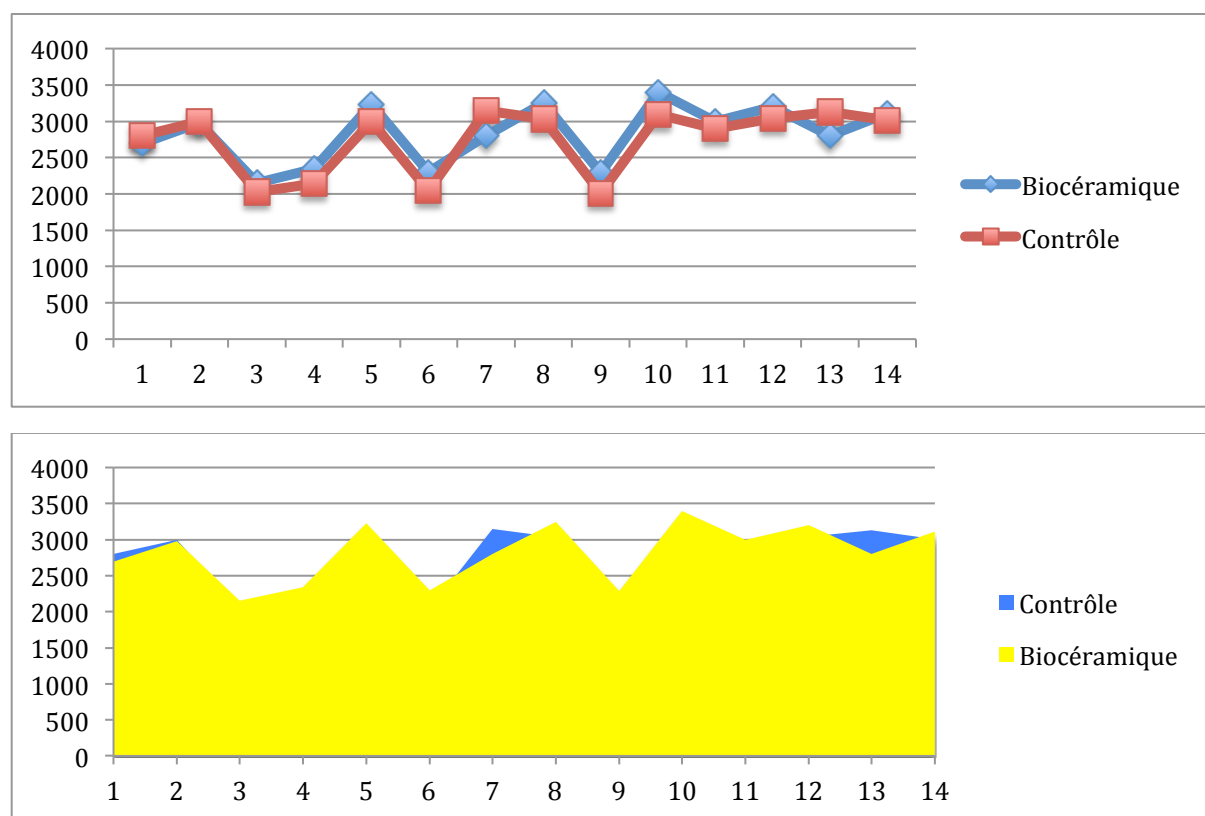
Les sujets ont parcouru avec la combinaison biocéramique en moyenne une distance de 2825 mètres avec un écart-type de ± 413 mètres.

Tableau 5: Distances parcourues par les sujets dans les 2 conditions (en mètre)

Sujets	Biocéramique	Contrôle
1	2700	2800
2	2980	3000
3	2150	2030
4	2340	2140
5	3230	3000
6	2300	2040
7	2800	3150
8	3250	3030
9	2290	2010
10	3400	3090
11	3000	2900
12	3200	3040
13	2800	3130
14	3110	3010

Tandis qu'avec la combinaison placebo, représentée ici sous la colonne « contrôle » la distance moyenne parcourue est de 2740 mètres ($\pm 460\text{m}$). Afin d'avoir une représentation plus générale des distances parcourues dans les 2 conditions, référons-nous au tableau ci-dessous.

Tableau 6: Représentations graphiques des distances parcourues en fonction des variables indépendantes.



Sur le premier graphique, nous constatons les différentes distances parcourues par les 14 sujets dans les 2 conditions. Concernant le second graphique, il y a une mise en évidence du fait que 10 sujets sur 14 ont couru plus longtemps et donc parcouru une distance plus grande avec la combinaison à induction biocéramique que la combinaison placebo.

4. Discussion et conclusions

La discussion de l'étude de Leung et ses collègues publiée en 2013 s'intitulant : « *Physiological Effects of Bioceramic Material: Harvard Step, Resting Metabolic Rate and Treadmill Running Assessments* » stipulait que le matériel biocéramique pouvait aider à réduire la dépense d'énergie du métabolisme au repos et augmenter, peut-être, la récupération du système cardiorespiratoire suivant un exercice en stimulant les réponses parasympathiques. Nous nous étions appuyés sur ces hypothèses pour établir le but de notre étude.

Ainsi l'objectif principal était de démontrer un effet des combinaisons à enduction biocéramique sur la physiologie des athlètes au niveau de leur récupération faisant suite à un exercice progressif d'intensité maximale. Cet objectif n'a pas été atteint, car nous n'avons trouvé aucune différence significative entre la combinaison à enduction biocéramique et la combinaison placebo.

Cependant, nous avons réussi à créer des données concernant l'indice de récupération cardiaque (RFC) pour chacun de nos sujets. Elles pourront être utilisées comme données de références considérant le fait que ces indices de récupération chez des sujets sains et actifs semblent montrer une bonne reproductibilité intra-sujets, ainsi qu'une bonne fiabilité concernant la reproduction du test (Tulumen et al., 2011).

En outre, une récupération rapide de la FC à un exercice post-moderé ou intense peut être utilisée comme indicateur d'une bonne fonction cardiovasculaire.⁶

Pour interpréter les RFC obtenus à 1 et 3 minutes post-exercice, nous devrions prendre en compte le fait que la récupération au départ (<1min) peut être attribuée à une réactivation du tonus vagal et que la récupération "tardive" (>2min) est probablement attribuée à une baisse de l'activité sympathique et aux facteurs humoraux comme les catécholamines (Perini et al., 1989 ; Kannankeril et al., 2004 ; Nilsson et al., 2007; Hart et al., 2006).

⁶ Vicente-Campos et al., 2014

En outre, Vicente-Campos et ses collègues ont obtenu dans leur étude une corrélation significative entre le pic de VO_2 (ml/kg/min) et RFC-3 ou %RFC-3/FC max confirmant ainsi l'effet de la capacité aérobie sur RFC. Ceci signifierait qu'une amélioration de la capacité aérobie serait liée en début de récupération (>1min) à une homéostasie intracellulaire efficiente et celle-ci serait suivie d'une réduction de l'impulsion synaptique des récepteurs musculaires périphériques.

Concernant le traitement des données, nous avons considéré un RFC comme le pourcentage du pic de la FC (FC max) enregistré durant le test. Nous avons préféré prendre ces mesures en tenant compte du fait que nos sujets étaient tous physiquement actifs et que les tests de stress se terminaient à une intensité maximale.

Par ailleurs, nos sujets ont tous une excellente capacité aérobie. Ceci est démontré par le fait que la moyenne de la récupération de la fréquence cardiaque pour la 3^e minute, exprimée en pourcentage de la FC max obtenue durant le test (%RFC-3/ FC max), correspond pour la condition placebo et biocéramique respectivement à : 38.50 ± 5.65 et 38.14 ± 5.06 .

Même si les données concernant la performance sportive liée à la distance parcourue n'étaient pas comprises dans le but principal de l'étude. Nous avons quand même analysé les résultats obtenus. Nous avons ainsi obtenu 10 sujets qui ont parcouru une plus grande distance avec la combinaison à induction biocéramique qu'avec la combinaison placebo. Cependant, après avoir effectué des tests de statistiques afin de vérifier la significativité de cette différence, il est apparu qu'elle ne l'était pas. Il nous est, donc, apparu non nécessaire d'insérer les différentes analyses statistiques concernant la performance des sujets.

Nous avons adopté un protocole de récupération mixte durant lequel la récupération était active durant les 2 premières minutes et passive dans la 3^e minute. Des protocoles similaires ont été utilisés dans d'autres études (Vicente-Campos et al., 2014 ; Maeder et al., 2009 ; Darr et al., 1988). Ceci est dû au fait que les tests de stress chez les athlètes étaient maximaux et que c'était plus optimal pour la santé de ces derniers de ne pas stopper abruptement l'exercice après avoir atteint le point d'épuisement.

La limitation principale de l'étude concerne le nombre de participants. Avec 14 participants, les différences inter-sujets sont beaucoup plus prononcées, et ceci malgré le fait d'avoir sélectionné cet échantillon dans une population plus ou moins homogène tant du point de vue de la condition physique que de l'âge. Il est nécessaire de mentionner que certains de nos sujets étaient des sportifs d'élite et qu'en conséquence ils n'avaient pas pu suivre les directives transmises qui étaient à respecter afin de se préparer de la manière la plus optimale qu'il soit aux tests (Annexe 2). En effet, ils effectuèrent des unités d'entraînement 24 heures avant nos tests. Néanmoins, l'influence du non-respect de ces directives était négligeable, car ils se sont présentés pour les deux passages avec la même préparation physique et les mêmes conditions d'entraînements.

Nos résultats sont uniquement référencés à un test sur tapis roulant. Il serait intéressant de tester ces combinaisons à induction biocéramique dans une autre discipline et surtout dans des conditions différentes. En effet, nous avons effectué les tests dans des conditions contrôlées et optimales pour la course à pied. La température était en moyenne située autour de 23 degrés Celsius et l'humidité relative était de 34 % en moyenne. Sachant que la biocéramique a des effets thermorégulateurs, il serait judicieux d'effectuer, par exemple, des tests dans un environnement refroidi.

Nous voulions tester l'influence des combinaisons biocéramiques sur la physiologie de l'athlète. Pour cela nous nous sommes focalisés sur la récupération de ce dernier faisant suite à un exercice progressif maximal. Dans un sens, nous avons atteint nos objectifs, car effectivement nous avons analysé et traité notre sujet. Même si les résultats ne sont pas significatifs, nous avons atteint le but de cette étude.

Cependant, si nous poussions plus loin la réflexion et que nous voulions essayer de démontrer une influence de ce type de combinaison sur la physiologie d'un athlète. Il faudrait peut-être considérer le problème sous un autre angle.

En effet, dans le livre intitulé : « Le guide du cardiofréquencemètre » écrit en 2009 par Carré et Laporte, les auteurs traitent de la fréquence cardiaque de récupération d'une manière intéressante à la page 42:

“... C’est la récupération dont le rôle physiologique est d’éliminer la chaleur produite en excès, de reconstituer les réserves en oxygènes et en substrats énergétiques des muscles et de rétablir l’équilibre des autres fonctions de l’organisme. On appelle cette phase le remboursement de la dette en oxygène. Dans la première minute qui suit l’arrêt de l’exercice, la FC doit diminuer rapidement sous l’effet du frein vagal. Au-delà, la diminution plus lente est due à la disparition des effets des catécholamines et à la restauration des équilibres des systèmes. (...) Autant la FC de repos est influençable par de nombreux facteurs internes ou externes, autant sa pente de décélération en récupération pour un sujet donné varie peu pour une même puissance absolue d’exercice et dans les mêmes conditions ambiantes.”

Il est, par ailleurs, mentionné qu’un entraînement en endurance peut modifier la cinétique de récupération. On parle de bonne récupération si la FC, à 3 minutes de repos, a baissé d’au moins 30% de la FC obtenue à la fin de l’effort.

Mais ce qui est important de retenir, c’est que la pente de décélération d’un athlète reste très peu influençable par des facteurs externes à un individu. Et c’est exactement ce que nous avons essayé d’influencer dans notre étude avec les combinaisons à induction biocéramique.

C’est pourquoi, nous supposons qu’une autre approche serait plus judicieuse quant à l’étude de l’influence physiologique des combinaisons à induction biocéramique sur des athlètes. Peut-être que les tester dans un environnement où l’on pourrait analyser d’autres paramètres physiologiques tels que la température, la transpiration ou la VO_2 serait plus judicieux.

Nous pouvons donc conclure que ces résultats ne permettent aucune application pour de nouvelles approches liées aux combinaisons à induction biocéramique au niveau de la récupération des athlètes après un exercice progressif maximal.

5. Bibliographie

Livres et articles dans ouvrages

- Carré, F., & Laporte, T. (2009). *Le guide du cardiofréquencemètre : De la théorie à la pratique*. Paris : Frison-Roche
- Harichaux, P., & Medelli, J. (2002). *Tests d'aptitude et tests d'effort*. Paris : Chiron
- Newsholme, E. A., Leech, T., Duester, G. (1998). *La course à pied. Bases scientifiques, entraînement et performances*. Bruxelles: De Boeck Université
- Poortmans, J., Boisseau N. (2012). *Biochimie des activités physiques et sportives*. Bruxelles: De Boeck Université
- Reiss, D., & Prévost, P. (2013). *La bible de la préparation physique*. Paris : Amphora
- Thomas, R., Eclache, J.-P., & Keller, J. (1989). *Les aptitudes motrices*. Paris : Vigot
- Weineck, J. (1997). *Manuel d'entraînement*. Paris : Vigot
- Wilmore, J. H., Costill, D. L. (2006). *Physiologie du sport et de l'exercice*. Bruxelles : De Boeck Université

Référence électronique

- Borresen, J., & Lambert, M. I. (2007). Changes in heart rate recovery in response to acute changes in training load. *Eur J Appl Physiol*, 101(4), 503-511. doi: 10.1007/s00421-007-0516-6
- Borresen, J. & Lambert, M. I. (2008). Autonomic control of heart rate during and after exercise: measurements and implications for monitoring training status. *Sports Med*, 38(8), 633-646
- Buchheit, M., Gindre, C. (2006). Cardiac parasympathetic regulation: respective associations with cardiorespiratory fitness and training load. *Am J Physiol Heart circ Physiol*, 291(1), 451-458. doi:10.1152/ajpheart.00008.2006
- Buchheit, M., Papelier, Y., Laursen, P. B., & Ahmaidi, S. (2007). Non-invasive assessment of cardiac parasympathetic function: postexercise heart rate recovery or heart rate variability. *Am J Physiol Heart circ Physiol*, 293(1), 8-10. doi:10.1152/ajpheart.00335.2007
- Bunc, V., Heller J., & Leso, J. (1988). Kinetics of heart rate responses to exercise. *J Sports Sci*, 6(1), 39-48. doi:10.1080/02640418808729792

Cole, C. R., Blackstone, E. H., Pashkow, F. J., Snader, C. E., & Lauer, M. S. (1999). Heart-rate recovery immediately after exercise as a predictor of mortality. *N Engl J Med*, 341(18), 1351–1357. doi:10.1056/n EJM199910283411804

Chorbajian, T. (1971). Normographic approach for the estimation of heart rate recovery time after exercise. *J Appl Physiol*, 31(6), 962-964

Cooke, W. H., & Carter, J. R. (2005). Strength training does not affect vagal-cardiac control or cardiovagal baroreflex sensitivity in young healthy subjects. *Eur J Appl Physiol*, 93(5–6), 719–725. doi:10.1007/s00421-004-1243-x

Darr, K. C., Bassett, D. R., Morgan, B. J., & Thomas, D. P. (1988). Effects of age and training status on heart rate recovery after peak exercise. *Am J Physiol*, 254(2 Pt 2), 340–343

Dodd, S., & Powers, S. K., et al. (1984). Blood lactate disappearance at various intensities of recovery exercise. *J. Appl. Physiol*, 57, 1462-1465

Esco, M. R., Olson, M. S., & Williford, H.N. (2010). The relationship between selected body composition variables and muscular endurance in women. *Res Q Exerc Sport*, 81(3), 272–277

Goldberg, D. I., & Shephard, R. J. (1980). Stroke volume during recovery from upright bicycle exercise. *J Appl Physiol*, 48(5), 833–837

Goldsmith, R. L., Bloomfield, D. M., & Rosenwinkel E.T. (2000). Exercise and autonomic function. *Coron Artery Dis*, 11(2), 129–135

Hart, E., Dawson, E., Rasmussen, P., George, K., Secher, N. H., Whyte, G., Shave, R. (2006). Beta-adrenergic receptor desensitization in man: insight into post-exercise attenuation of cardiac function. *J Physiol*, 577(2), 717-725

Hirsh, D. S., Vittorio, T. J., Barbarash, S. L., Hudaihed, A., Tseng, C. H., Arwady, A., Goldsmith, R. L., & Jorde, U. P. (2006). Association of heart rate recovery and maximum oxygen consumption in patients with chronic congestive heart failure. *J Heart lung transplant*, 25(8), 942–945. doi:10.1016/j.healun.2006.04.006

Huikuri, H. V., Jokinen, V., Syvanne, M., Nminen, M. S., Airaksinen, K. E., Ikaheimo, M. J., Koistinen, J. M., Kauma, H., Kesaniemi, A. Y., Maja-Halme, S., Niemela, K. O., & Frick, M. H. (1999). Heart rate variability and progression of coronary atherosclerosis. *Arterioscler thromb. Vasc Biol*, 19(8), 1979–1985

Kannankeril, P. J., Le F. K., Kadish, A. H., Goldberger, J. J. (2004). Parasympathetic effects on heart rate recovery after exercise. *J Investing Med*, 52(6), 394-401

Katsuura, T., Fukuda, S., Okada, A., & Kikuchi, Y. (1989). Effect of ceramic-coated clothing on forearm blood flow during exercise in a cool environment. *Ann Physiol Anthropol*, 8(1), 53-55

Kirby, T., & Hartung, G. H. (1980). Briefly: heart rate deceleration in conditioned and unconditioned men. *Am correct ther J*, 34(6), 162-163

Leung, T. K., Lee, C. M., Tsai, S. Y., Chen, Y. C., & Chao, J. S. (2011). A pilot study of ceramic powder far-infrared-ray irradiation (cFIR) on physiology : Observation of cell cultures and amphibian skeletal muscle. *Chin J Physiol*, 54(4), 247-254. doi : 10.4077/CJP.2011.AMM044

Leung, T. K., Kuo, C. H., Lee, C. M., Kan, N. W., & Hou, C. W. (2013). Physiological effects of bioceramic material : harvard step, resting metabolic rate and treadmill running assessments. *Chin J Physiol*, 56(6), 334-340. doi : 10.4077/CJP.2013.BAB132

Maeder, M. T., Ammann, P., Rickli, H., Brunner-La Rocca, H. P. (2009). Impact of the exercise mode on heart rate recovery after maximal exercise. *Eur J Appl Physiol*, 105(2), 247-255. Doi: 10.1007/s00421-008-0896-2

Martinmaki, K., & Rusko, H. (2008). Time-frequency analysis of heart rate variability during immediate recovery from low and high intensity exercise. *Eur J Appl Physiol*, 102(3), 353-360. doi:10.1007/ s00421-007-0594-5

Nilsson, G., Hedber, P., Jonason, T., Lonnberg, I., Ohrvik, J. (2007). Heart rate recovery is more strongly associated with the metabolic syndrome, waist circumference, and insulin sensitivity in women than in men among the elderly in the general population. *Am Heart J*, 154(3), 60-467. Doi: 10.1016/j.ahj.2007.06.025

Parekh, A., & Lee, C. M. (2005). Heart rate variability after isocaloric exercise bouts of different intensities. *Med Sci Sports Exerc*, 37(4), 599-605

Perini, R., Orizio, C., Commande, A., Castellano, M., Beschi, M., Veicsteinas, A. (1989). Plasma norepinephrine and heart rate dynamics during recovery from submaximal exercise in man. *Eur J Appl Physiol*, 58(8), 879-883

Rosbergs, R. A., Ghiasvand, F., & Parker, D. (2004). Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 287(3), R502-16.

Savin, W. M., Davidson, D. M., & Haskell, W. I. (1982). Autonomic contribution to heart rate recovery from exercise in humans. *J Appl Physiol*, 53(6), 1572-1575

Seiler, S., Haugen, O., & Kuffel, E. (2007). Autonomic recovery after exercise in trained athletes: intensity and duration effects. *Med Sci Sports Exerc*, 39(8), 1366–1373. doi:10.1249/mss.0b013e318060f17d

Short, K. R., & Sedlock, D. A. (1997). Excess postexercise oxygen consumption and recovery rate in trained and untrained subjects. *J Appl Physiol*, 83(1), 153–159

Sidney, K. H., & Shephard, R. J. (1978). Frequency and intensity of exercise training for elderly subjects. *Med Sci Sports*, 10(2), 125–131

Spriet, L. L., Howlett, R. A., et al. (2000). An enzymatic approach to lactate production in human skeletal muscle during exercise. *Med. Sci. Sports Exerc*, 32, 756-763

Tulumen, E., Khalilayeva, I., Aytemir, K., Ergun, Baris Kaya, F.E., Sinan Deveci, O., Aksoy, H., Kocabas, U., Okutucu, S., Tokgozoglu, L., Kabakci, G., Ozkutlu, H., & Oto, A. (2011). The reproducibility of heart rate recovery after treadmill exercise test. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, 16(4), 365-372. Doi : 10.1111/j.1542-474x.2011.00464.x

Vatansever, F., & Hamblin, M. R. (2012). Far infrared radiation (FIR): its biological effects and medical applications. *Photonics Lasers Med*, 4, 255-266. Doi : 10.1515/plm-2012-0034

Vicente-Campos, D., Lopez, A. M., Nunez, M. J., & Chicharro, J. J. (2014). Heart rate recovery normality data recorded in response to a maximal exercise test in physically active men. *Eur J Appl Physiol*, (114), 1123-1128. doi : 10.1007/s00421-014-2847-4

Yoo, H. H., Kim, Y. H., Cho, H. T., Shim, H. J., & Lee, K. B. (1993). Improvement of warmth retaining property of water vapor permeable/ waterproof coated nylon fabric. *J Korean Fiber Soc*, 30(3), 250-258

6. Déclaration personnelle

« Je soussigné certifie avoir réalisé le présent travail de façon autonome, sans aide illicite quelconque. Tout élément emprunté littéralement ou mutatis mutandis à des publications ou à des sources inconnues, a été rendu reconnaissable comme tel. »

Lieu, date

Signature

7. Droits d'auteur

« Je soussigné reconnais que le présent travail est une partie constituante de la formation en Sciences du Mouvement et du Sport à l'Université de Fribourg. Je m'engage donc à céder entièrement les droits d'auteur- y compris les droits de publication et autres droits liés à des fins commerciales ou bénévoles- à l'Université de Fribourg.

La cession à tiers des droits d'auteur par l'Université est soumise à l'accord du soussigné uniquement.

Cet accord ne peut faire l'objet d'aucune rétribution financière. »

Lieu, date

Signature

8. Annexes

8.1. Annexe 1 : Données des sujets

No. des sujets	Combinaison	VMA	Vitesse départ	FC max.	60% FC max.	Taille	Poids	Age
1	A	16.5	11.055	194	116.4	162	52	1991
2	B	16.5	11.055	211	126.6	177	63	1992
3	A	14.5	9.715	204	122.4	165	58	1993
4	B	14.5	9.715	195	117	169	55	1994
5	A	18.5	12.395	203	121.8	175	65	1993
6	B	15.5	10.385	206	123.6	168	59	1995
7	A	16.5	11.055	198	118.8	178	70	1995
8	B	19	12.73	196	117.6	174	63	1994
9	A	15	10.05	201	120.6	165	60	1995
10	B	17.5	11.725	204	122.4	178	75	1994
11	A	17.5	11.725	209	125.4	175	64	1994
12	B	17.5	11.725	201	120.6	172	63	1994
13	A	17.5	11.725	201	120.6	178	75	1994
14	B	16	10.72	199	119.4	192	78	1994

Données pour le 1^{er} test, les combinaisons seront respectivement inversées pour le 2^{ème} test.

Combinaison A: Biocéramique

Combinaison B: Placebo

8.2. Annexe 2 : Directives transmises au sujet

Directives à respecter durant une période précédant un test pour une préparation optimale à l'effort.

Un sujet qui s'est inscrit à une étude scientifique dans le domaine des sciences du mouvement a la responsabilité de se présenter frais et disponible pour les tests. Cela signifie qu'il y a quelques critères à respecter afin que les mesures prises soient valides.

- ✓ Avoir un minimum de 8 heures de sommeil.
- ✓ Être bien hydraté.
- ✓ Ne pas être malade ou sous infection virale.
- ✓ Ne pas consommer de repas copieux 4 heures avant le test.
- ✓ Ne pas consommer de caféine, d'alcool ou autres stimulants 12 heures avant le test.
- ✓ Ne pas fumer 2 heures avant le test.
- ✓ Ne pas effectuer d'exercice intense 24 heures avant le test.

8.3. Annexe 3 : Analyses statistiques

Test paramétrique pour les indices de récupération de la fréquence cardiaque 1 minute après la fin de l'effort (RFC-1):

SKEWNESS KURTOSIS NORMALITY		
	V1	V2
median	16.41283872	18.3769231
mean	17.44212309	18.2960329
SE.mean	1.36999292	1.3815827
CI.mean.0.95	2.95968977	2.9847279
var	26.27632849	26.7227895
std.dev	5.12604414	5.1694090
coef.var	0.29388877	0.2825426
skewness	0.82303750	-0.3359054
skew.2SE	0.68887277	-0.2811489
kurtosis	-0.10725597	-0.7815326
kurt.2SE	-0.04646936	-0.3386042
normtest.W	0.89633817	0.9565688
normtest.p	0.09980619	0.6664175

Levene test : pour tester l'homogénéité des variances :

```
LEVENE:
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group 1  0.2173  0.645
      26
```

Nos données RFC-1 concernant les 14 sujets sont paramétriques.

Test paramétrique pour les indices de récupération de la fréquence cardiaque 3 minutes après la fin de l'effort (RFC-3):

	SKEWNESS KURTOSIS NORMALITY	
	V1	V2
median	38.73303386	39.2243590
mean	38.13850593	38.5028366
SE.mean	1.35139430	1.5098373
CI.mean.0.95	2.91950989	3.2618052
var	25.56773172	31.9145221
std.dev	5.05645446	5.6492939
coef.var	0.13258135	0.1467241
skewness	-0.75292920	-0.4742829
skew.2SE	-0.63019295	-0.3969692
kurtosis	0.11345591	-0.6922635
kurt.2SE	0.04915553	-0.2999278
normtest.W	0.94109726	0.9656952
normtest.p	0.43256558	0.8144582

Levene test : pour tester l'homogénéité des variances :

LEVENE:			
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)			
	Df	F value	Pr(>F)
group 1	0.2901	0.5947	
26			

Nos données RFC-3 concernant les 14 sujets sont paramétriques.

8.4. Annexe 4 : Mesures et résultats obtenus lors des tests

Combinaison Placebo :

Sujets	Hygrométrie	T. salle	T.pré-test	T.post-test	Temps	Pallier (km/h)	Distance	RPE
1	30.6	23.1	37.4	36.9	12:18	17	2800	20
2	38.6	22.9	36.3	36.7	13:08	17.5	3000	19
3	30.7	22.9	36.5	36.8	10:20	14.5	2030	18
4	36.9	22.7	37	37.2	11:01	15	2140	19
5	25.6	22.5	36.7	36.8	12:01	18.5	3000	18
6	39.3	21.9	36.7	37	10:01	15.5	2040	19
7	32	23.2	36.6	36.4	13:30	17.5	3150	19
8	36.8	22.7	36.5	36.4	12:05	18	3030	18
9	29.7	23.3	36.5	36.9	10:11	15	2010	20
10	39.3	23.2	36.8	35.6	13:11	18	3090	19
11	30.7	23.1	36.1	36.6	12:27	17.5	2900	20
12	39.3	23.5	36.5	36	12:45	17.5	3040	18
13	30.5	23.1	36.5	37.1	13:00	18	3130	17
14	23.8	22.8	37	36.6	13:23	17	3010	19

Combinaison Biocéramique :

Sujets	Hygrométrie	T. salle	T.pré-test	T.post-test	Temps	Pallier (km/h)	Distance	RPE
1	35.2	22.8	37.4	37	12:12	17	2700	20
2	24.9	23.1	36.4	37	12:54	17	2980	19
3	40.5	22.7	36.7	37.1	11:06	15	2150	19
4	32.6	22.7	36.8	37.3	11:40	15	2340	19
5	36.9	22.9	36.6	37	12:59	18.5	3230	18
6	32.8	23.2	36.5	36.8	10:59	15.5	2300	20
7	39.8	21	37	36.2	12:15	17	2800	18
8	30.7	23	36.8	36.6	13:00	18	3250	19
9	34.7	22.2	36.5	37.1	11:05	15.4	2290	20
10	30.2	23.3	37	36.8	14:00	18.5	3400	20
11	40.6	23.3	36.6	37.2	13:11	18	3000	20
12	30.6	22.9	36.2	36.3	13:20	18	3200	18
13	38.6	22.3	37.3	36.8	12:00	17.5	2800	18
14	30.1	23.2	36.5	36.5	14:00	17.5	3110	20

8.5. Annexe 5 : Valeurs numériques obtenues pour les indices de récupérations à 1 et 3 minutes

RFC-1-bio	RFC-1-contr
34.4	32
60.4	51.8
34.8	39.6
22.6	14.4
22.2	26.6
33.8	27.8
46.4	46.8
35.2	35.4
29.8	37.2
31	42.6
30.2	43.6
45.4	49.4
30.6	27.2
33	35

RFC-3-bio	RFC-3-contr
82.4	82.2
94.2	89.8
88.2	85.2
73.4	51.4
55	64.4
78	75
75.8	87.8
82.2	74
75.2	82.8
71.6	81
69.4	75
83	88.8
65.6	65.8
79.6	68.2